

На правах рукописи



МАРЧУКОВА ОЛЕСЯ ВЛАДИМИРОВНА

**СОБЫТИЯ ЛА-НИНЬЯ: ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСОБЕННОСТИ
ФОРМИРОВАНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ В
АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем»

Научный руководитель: **Воскресенская Елена Николаевна**
доктор географических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Институт природно-
технических систем»

Официальные оппоненты: **Нестеров Евгений Самойлович**
доктор географических наук, заведующий
отделом морских гидрологических прогнозов ФГБУ
«Гидрометцентр России»

Гущина Дарья Юрьевна
доктор географических наук, профессор
кафедры метеорологии и климатологии МГУ
имени М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Казанский (Приволжский)
федеральный университет"

Защита диссертации состоится «___» _____ 2022 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 002.046.04 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью) просим направлять по адресу 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета Д 002.046.04, Зайцевой И.С.
Факс 8 (495) 959-00-33, e-mail: d00204604@igras.ru.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук

И.С. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

Явление Ла-Нинья – холодный эпизод феномена Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК). Этот глобальный климатический сигнал межгодового масштаба обуславливает формирование существенных аномалий климата и окружающей среды в разных регионах Земли [Rasmusson, Carpenter, 1982; Philander, 1990; Webster et al., 1998; Chang et al., 2000; Chen et al., 2013].

Социально-экономические последствия событий Ла-Нинья беспрецедентны. Засуха в США привела к ущербу в 40 млрд. \$ [Glantz, 2002] во время событий 1988 г. и в 500 млн. \$ при Ла-Нинья 2007–2008 гг. [Manuel, 2008]. В Австралии же, напротив, во время Ла-Нинья 2010–2011 гг. из-за сильных наводнений большая территория страны была объявлена зоной бедствия [Miller, 2019].

Прогнозирование Ла-Нинья до сих пор остается нерешенной научной проблемой: не были предсказаны начало и продолжительность Ла-Нинья 1998–2000 гг. [Picaut et. al., 2002] и 2016–2018 гг. [Feng et. al., 2020]. Одной из причин неудачных прогнозов холодной фазы ЭНЮК является недостаточная изученность особенностей этих событий в отличие от его теплой фазы, Эль-Ниньо. В результате меньшего опыта прогнозирования интенсивности или местоположения аномалий Ла-Нинья затруднено определение масштабов экологических и социальных последствий по всему миру.

В последнее десятилетие вырос интерес к классификации Ла-Нинья [Cai, Cowan, 2009; Shinoda, 2013, Yuan, Yan, 2013; Zhang et. al., 2014], однако методы разделения событий являются математически спорными, а механизм формирования полученных типов не описан ни в одной работе. Поэтому вопрос типизации Ла-Нинья остается открытым, а проявления разных его типов не достаточно описаны, в том числе, для Европейского региона. Таким образом, изучение условий и особенностей формирования Ла-Нинья является актуальной научной темой. Помимо получения новых знаний оно может помочь в развитии методов предсказания этих явлений, а их заблаговременный прогноз позволит свести к минимуму возможные негативные последствия.

Объект исследования – события Ла-Нинья.

Предмет исследования – крупномасштабные межгодовые аномалии в системе океан-атмосфера экваториальной зоны Тихого океана и соответствующие им климатические аномалии в Атлантико-Европейском регионе в годы разных типов Ла-Нинья.

Цель и задачи.

Основная цель работы – комплексное исследование событий Ла-Нинья разных типов и их проявлений в Атлантико-Европейском регионе.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие научные задачи:

1. Провести типизацию событий Ла-Нинья на основе метода математической классификации с учетом их пространственно-временной изменчивости.

2. Изучить особенности формирования и эволюции полученных типов Ла-Нинья.

3. Исследовать климатические аномалии в Атлантико-Европейском регионе, соответствующие полученным типам Ла-Нинья.

Данные и методы исследования.

В работе привлекалось многочисленное количество разных видов данных. Из них можно выделить следующие группы.

Реконструированные массивы среднемесячных данных температуры поверхности океана (ТПО):

- HadISST Метеорологического офиса Гадлея (Великобритания), с разрешением сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ с 1870 по 2019 гг.;
- COBE SST2 Японского метеорологического агентства в узлах пространственной сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ с 1850 по 2019 гг.;
- ERSSTv5 Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) с разрешением $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ с 1854 по 2019 гг.

Данные разных типов реанализа:

- среднемесячные поля скорости и направлений течений, среднемесячной температуры воды по глубине от 5 м до 4000 м из реанализа NCEP GODAS с 1981 по 2019 гг (40 слоев по глубине, шаг по пространству – 1°);
- среднемесячные поля температуры воздуха и приземного давления из реанализа 20 столетия (20th Century Reanalysis V2c) с шагом сетки в 2° с 1900 по 2014 гг.;
- среднемесячные поля атмосферных осадков из массива GPCC для периода 1901–2013 гг.

Данные наблюдений:

- среднемесячные данные ТПО с буев проекта TOGA-TAO с 1981 по 2019 гг.;
- ежедневные данные приземных наблюдений за температурой воздуха, привязанных к сетке с разрешением $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$, из базы E-OBS 19.0e с 1950 по 2019 гг.

Спутниковые данные:

- ежемесячные данные ТПО спутника MODIS (Terra Global Level 3) с разрешением 9 км с 2001 по 2019 гг.;
- спутниковые данные о хлорофилле с 2001 по 2019 гг. проекта GlobColour (обедненные данные с датчиков SeaWiFS (NASA), MODIS (NASA), MERIS (ESA), OLCI-A (ESA), VIIRS (NOAA/NASA));

Дополнительно в работе привлекались индексы взаимодействия атмосферы и океана: Nino1+2, Nino3, Nino4, Nino3, SOI, NAO, EA, EP TWI, CP TWI, WP TWI.

В качестве основного метода математической классификации событий Ла-Нинья был выбран кластерный анализ с иерархическим подходом. Изучение особенностей формирования полученных типов Ла-Нинья и их дальное действие в Атлантико-Европейском районе проводилось с помощью хорошо известных, многократно апробированных методов статистического анализа пространственно-временных рядов, таких как корреляционный, разложение на эмпирические ортогональные функции и композитный анализ с уровнем значимости 95%.

Научная новизна.

По данным продолжительностью более 100 лет из нескольких реконструированных массивов о температуре поверхности океана (ТПО) с использованием современных методов анализа на статистически значимом уровне доказано существование двух типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского, различающихся по месту возникновения, характеру эволюции, продолжительности и интенсивности событий.

Впервые выявлены физические различия и особенности формирования полученных двух типов Ла-Нинья в экваториальной зоне Тихого океана на основе расчета и анализа композитных полей ТПО, приземного давления и ветра, изменения вертикального профиля температуры воды, концентрации хлорофилла, поверхностных течений и других гидрометеорологических характеристик.

Впервые установлены закономерности последовательности возникновения выделенных Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья относительно канонического Эль-Ниньо и Эль-Ниньо «Modoki». На основе разложения пространственно-временных полей аномалий ТПО на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) в экваториальной полосе Тихого океана показана асимметрия в продолжительности существования Эль-Ниньо и Ла-Нинья разных типов.

Выявлены характерные особенности проявлений выделенных типов Ла-Нинья в межгодовых аномалиях гидрометеополей Атлантико-Европейского региона в холодное полугодие. Статистически доказано, что аномалии в гидрометеополях Европы в годы разных типов Ла-Нинья сопровождаются усилением или ослаблением Восточно-Атлантического или Североатлантического колебаний.

Научная и практическая значимость результатов.

Полученные в работе результаты направлены на решение фундаментальной научной проблемы в области взаимодействия океана и атмосферы в тропиках тихоокеанского сектора в холодную фазу ЭНЮК. Комплексное исследование событий Ла-Нинья, их классификация, выявленные закономерности формирования и влияние на Атлантико-Европейский регион дают основу для совершенствования теории климата. Практическая значимость полученных результатов позволяет составить долгосрочный статистический

прогноз погодных-климатических условий Европы в холодное полугодие от момента возникновения бассейна отрицательных аномалий ТПО в экваториальной зоне Тихого океана до их завершения. Кроме этого, результаты работы могут быть использованы для решения многих прикладных задач, в частности, в практической работе структурных подразделений «Гидрометцентра России», при подготовке рекомендаций заинтересованным ведомствам, например, для перспективного планирования в аграрном комплексе европейской части России или для рационального использования рекреационного потенциала Черного и Азовского морей. В будущем результаты можно применить для усовершенствования образовательных курсов географического и климатического профилей ВУЗов Российской Федерации. Полученные результаты включены в отчеты по государственным научным темам, а также грантов РФФИ, что подтверждает их практическую значимость.

Теоретическая и практическая значимость работы подтверждается и тем, что диссертационные результаты были получены в рамках выполнения государственных научных программ и тем НАН Украины, РАН, в частности, темы госзадания Института природно-технических систем № 0012-2021-0007 (121122300072-3) «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия». Частично полученные результаты были представлены в ряде грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 16-05-00231 "События Эль-Ниньо и Ла-Нинья: классификация, особенности и проявления в погодных-климатических аномалиях в Черноморском регионе"; № 16-35-00186 "Исследование климатических условий Черноморского побережья России в связи с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья"; № 18-45-920063 "Медико-климатическая характеристика туристско-рекреационного региона Севастополя в условиях наблюдаемых изменений климата"; № 20-45-920008 "Воздействие изменения климата на виноградарство в Севастопольском регионе".

Положения, выносимые на защиту:

1. Иерархическим методом кластерного анализа с учетом интенсивности отрицательных аномалий ТПО и их пространственного расположения в зрелую фазу с 1870 по 2019 гг. доказано наличие двух пространственных типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского. Получены количественные и качественные оценки физических различий формирования выделенных типов Ла-Нинья в экваториальной зоне Тихого океана на основе анализа полей приземного ветра, изменения температуры воды по глубине, концентрации хлорофилла, поверхностных течений и других гидрометеорологических характеристик.

2. Установлены закономерности формирования Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья относительно канонического Эль-Ниньо и Эль-Ниньо «Modoki». На основе разложения

пространственно-временных полей аномалий ТПО в экваториальной полосе Тихого океана на эмпирические ортогональные функции получено две основных моды. Первая мода ЭОФ (~44,5%) в физическом смысле демонстрирует концепцию двухлетнего Ла-Нинья и подтверждает, что события Эль-Ниньо и Ла-Нинья асимметричны друг к другу. Вторая мода ЭОФ (~22 %) описывает однолетний Восточно-Тихоокеанский тип Ла-Нинья, после которого возможно образование Эль-Ниньо «Modoki».

3. Выявлены характерные особенности в межгодовых аномалиях гидрометеополей Атлантико-Европейского региона при разных типах Ла-Нинья. Статистически доказано, что климатические аномалии в Европе в годы разных типов Ла-Нинья возникают через усиление или ослабление Восточно-Атлантического или Североатлантического колебаний.

Личный вклад автора.

Соискатель активно участвовал в постановке задач, интерпретации полученных результатов и формулировке выводов. В ходе выполнения диссертационной работы автором самостоятельно были проведены обработка, анализ и верификация всех массивов данных, написаны программные коды для решения поставленных задач. Соискатель активно участвовал в интерпретации полученных результатов и формулировке выводов. Автором лично были подготовлены материалы к научным публикациям в рецензируемых изданиях, представлены результаты на многочисленных всероссийских и международных конференциях.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов работы обеспечена проведенным комплексным статистическим анализом большого объема данных за длительный период, из разных источников (реанализы, спутниковая информация, буи TOGA-TAO и т.д. с учетом значимости и стандартных ошибок). Новизна научных результатов подтверждена публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах, размещенных в наукометрических базах РИНЦ, ВАК, SCOPUS и Web of Science.

Результаты диссертационной работы докладывались на семинарах Лаборатории крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и изменений климата Института природно-технических систем в период 2015 по 2022 гг. Кроме этого, полученные результаты были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях: Международная научная конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Севастополь, 2014–2017); Международная научная конференция студентов и молодых ученых "Современная гидрометеорология: актуальные проблемы и пути их решения" (Одесса, 2014); Научно-практическая молодежная конференция «Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами» (Севастополь, Ялта, 2014–2018); 19-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы»

(Туапсе, 2015); Международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2015–2021); International Geographical Union Regional Conference: Geography, Culture and Society for our Future Earth (Moscow, 2015); Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2015); Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (Севастополь, 2016); I Черноморская научно-практическая конференция МГУ «Проблемы безопасности в современном мире» (Севастополь, 2016); Международная научная конференция памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова «Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии» (Ростов-на-Дону, 2016); V Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование – MARESEDU» (Москва, 2016); XXV международная научно-техническая конференция «Прикладные задачи математики» (Севастополь, 2017); Всероссийская конференция "Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития" (Санкт-Петербург, 2017); Всероссийская научная конференция «Моря России» (Севастополь, 2017–2021); International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences (Moscow, 2019); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, Севастополь, Санкт-Петербург, 2018–2020); Молодежная научная конференция «Морские исследования и рациональное природопользование» (Севастополь, 2018); V Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 2019); Международная научно-практическая конференция «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы» (Воронеж, 2019); International Conference «Climate Change: Causes, Risks, Consequences, Problems of Adaptation and Management» (Moscow, 2019); Международная конференция и Школа молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой (Иркутск, 2021); XII международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, Камчатский край, 2021).

Публикации по теме диссертации.

Результаты настоящей диссертационной работы опубликованы в 23 научных статьях. Требованию ВАК при Минобрнауки Российской Федерации соответствуют 22 работы в рецензируемых российских научных изданиях. Из них 10 научных статей входят в наукометрические базы SCOPUS и Web of Science.

Кроме этого опубликовано 42 тезиса докладов, размещенных в системе РИНЦ, а результаты работы апробированы на 35 всероссийских и

международных научных конференциях. Требования к публикациям основных научных результатов диссертации, предусмотренных в п. 11 и 13 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, соблюдены.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, приложения и списка использованных источников. Объем работы составляет 169 страниц. Текст исследования иллюстрирован 50 рисунками. Библиографический список включает в себя 216 наименований, в том числе 182 на английском языке.

Благодарности.

Автор искренне благодарит своего научного руководителя, доктора географических наук, профессора Е.Н. Воскресенскую за предоставленную тему и идею диссертации, грамотное руководство и ценные рекомендации. Автор признателен за помощь своему коллеге и соавтору многих публикаций Лубкову А.С.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выбранной темы исследования, поставлены цель и задачи, описаны новизна, практическая и теоретическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация полученных результатов и публикации по теме диссертации.

В **Главе 1** проведен критический анализ литературных источников. Выяснено, что события Ла-Нинья – это недостаточно изученный холодный эпизод глобального процесса ЭНЮК, отклики которого обуславливают специфические межгодовые аномалии климата и окружающей среды в разных регионах Земли. Представлено описание современного состояния достаточно ограниченной изученности событий Ла-Нинья по сравнению с изученностью Эль-Ниньо, включая его классификацию и моделирование. Обобщены представления об особенностях формирования Ла-Нинья по изменениям в атмосфере и океане. При этом в связи с тем, что к настоящему времени отсутствует четкий критерий ВМО для выделения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, возможно использовать различные обоснованные подходы и методы. Обозначен вопрос о том, что для более корректного исследования явлений Ла-Нинья и их проявлений на нынешнем этапе исследований чрезвычайно важна классификация Ла-Нинья и понимание механизма, объясняющего влияние событий Ла-Нинья на формирование аномалий окружающей среды в отдаленных регионах Земли.

Из недостаточно емкого объема результатов (не больше десяти опубликованных работ с использованием, порой, ограниченного количества

данных) видно, что к настоящему времени нет четкого консенсуса о типизации событий Ла-Нинья по сравнению с событиями Эль-Ниньо. Отсюда исходит острая необходимость поиска правильного подхода к типизации событий Ла-Нинья. При этом, после выделения типов Ла-Нинья, изучение региональных откликов становится следующим важным этапом.

Таким образом, выявленные проблемы в изучении событий Ла-Нинья указывают на необходимость тщательного анализа их возникновения, типизации и выявления закономерностей формирования глобальных и региональных климатических аномалий нашей планеты Земля под влиянием холодного эпизода ЭНЮК.

В **Главе 2** описываются используемые массивы реконструированных данных и реанализов, приведена оценка их качества. Рассматриваются методы выделения событий Ла-Нинья, их классификации, анализа выделенных типов и их региональных откликов.

Проведено сравнение трех основных глобальных массивов реконструированных среднемесячных значений ТПО с 1870 по 2019 гг. (ERSSTv5, HadISST и COBE SST2). Оно показало тесную линейную связь между данными массивов в районе экваториальной зоны Тихого океана с коэффициентами корреляции от 0,7 до 0,95. Среднеквадратические отклонения массивов HadISST и COBE SST2 относительно друг друга не превышают $0,4^{\circ}\text{C}$. Это частично объясняется использованием при реконструкции данных некоторых аналогичных методов [Hirahara et al., 2014]. Качество массивов ERSSTv5, HadISST и COBE SST2 указывает на безусловную возможность использования таких данных для вполне достоверных оценок крупномасштабных низкочастотных процессов. В отличие от тесной связи между HadISST и COBE SST2, ERSSTv5 отличается от них: среднеквадратические отклонения этого массива в районах Nino3 и Nino4 в среднем равны $0,7^{\circ}\text{C}$.

По результатам верификации реконструированных массивов ТПО с данными наблюдений и спутниковой информацией показано, что в COBE SST2 были незначительно лучше усвоены данные буев проекта TOGA-TAO. Сравнивая анализируемые массивы со спутниковыми данными Terra (MODIS), которые не усваивались ни в одной из реконструкций, COBE SST2 показал несколько лучшую воспроизводимость изменчивости аномалий ТПО за период 2001–2019, в сравнении с другими массивами. Однако массив HadISST имеет наименьшие среднеквадратические отклонения от спутниковых данных Terra (MODIS) и данных проекта NOAA IO SST v2.

В этой же главе обоснован выбор иерархического кластерного анализа в качестве основного метода классификации Ла-Нинья. Кроме этого показано, что для исследования повторяемости и закономерности возникновения событий Ла-Нинья относительно Эль-Ниньо подходит метод разложения на эмпирические ортогональные функции пространственно-временных полей ТПО в экваториальной зоне Тихого океана.

Таким образом, показано, что доступные в настоящее время глобальные и региональные массивы данных, а также предложенные методы позволяют анализировать низкочастотную изменчивость в системе океан-атмосфера, а также ее региональные проявления на межгодовых и десятилетних масштабах.

В **Главе 3** по данным за более чем вековой период выделены события Ла-Нинья, получены их статистические характеристики и проведена сама классификация, позволившая выделить два типа событий. Изучены особенности возникновения и эволюции каждого из выявленных типов Ла-Нинья по набору параметров системы океан-атмосфера.

С использованием оптимального критерия интенсивности аномалии ТПО в районе Nino3.4 ($-0,5^{\circ}\text{C}$), минимальной продолжительности существования этой аномалии в течение пяти последовательных месяцев по трем массивам данных HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 за период с 1870 по 2019 гг. выделено 33, 32 и 35 событий Ла-Нинья. Их вклад в общую дисперсию аномалий ТПО в районе Nino3.4 составил 20,3%, 24,1% и 18,5%, соответственно.

Иерархическим методом кластерного анализа с учетом интенсивности отрицательных аномалий ТПО и их пространственной локализации в зрелую фазу доказано наличие двух пространственных типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского (ВТ) и Центрально-Тихоокеанского (ЦТ). В результате анализа эволюции каждого из типов описаны их особенности.

Выявлено, что события Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа обычно возникают в мае или июне в центре экваториальной зоны Тихого океана. Важную роль при этом играет интенсификация пассатных ветров в этом регионе. Летом, в начальной стадии развития явления там же формируется интенсивный апвеллинг, при котором концентрация хлорофилла «А» увеличивается в 6-8 раз (с $0,1 \text{ мг/м}^3$ до $0,8 \text{ мг/м}^3$), а термоклин в экваториальной зоне между 170° – 100° з.д. поднимается до глубины 50 м. Максимальная фаза развития таких событий приходится на ноябрь-январь. Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа возникают в апреле и всегда на востоке. При этом центрально-экваториальный апвеллинг не образуется. Отрицательная аномалия ТПО формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого интенсификацией Пассатных ветров над восточно-экваториальным сектором Тихого океана. Максимальная фаза таких событий обычно приходится на октябрь-декабрь.

В то же время в главе 3 был проведен ЭОФ анализ пространственно-временных полей ТПО в экваториальной полосе Тихого океана по массивам HadISST и COBE SST2, который выявил наличие двух основных мод. Первая ЭОФ (43,2% по HadISST и 45,6% по COBE SST2) в физическом смысле демонстрирует два последовательных Ла-Нинья, которые возникают после интенсивного канонического Эль-Ниньо (рис. 1, а, в). При этом максимально отрицательная аномалия ТПО формируется в центрально-экваториальной зоне Тихого океана в конце осени – начале зимы, затем угасает и ровно через год

усиливается снова. Это доказывает концепцию двухлетнего Ла-Нинья и подтверждает, что события Эль-Ниньо и Ла-Нинья асимметричны друг к другу.

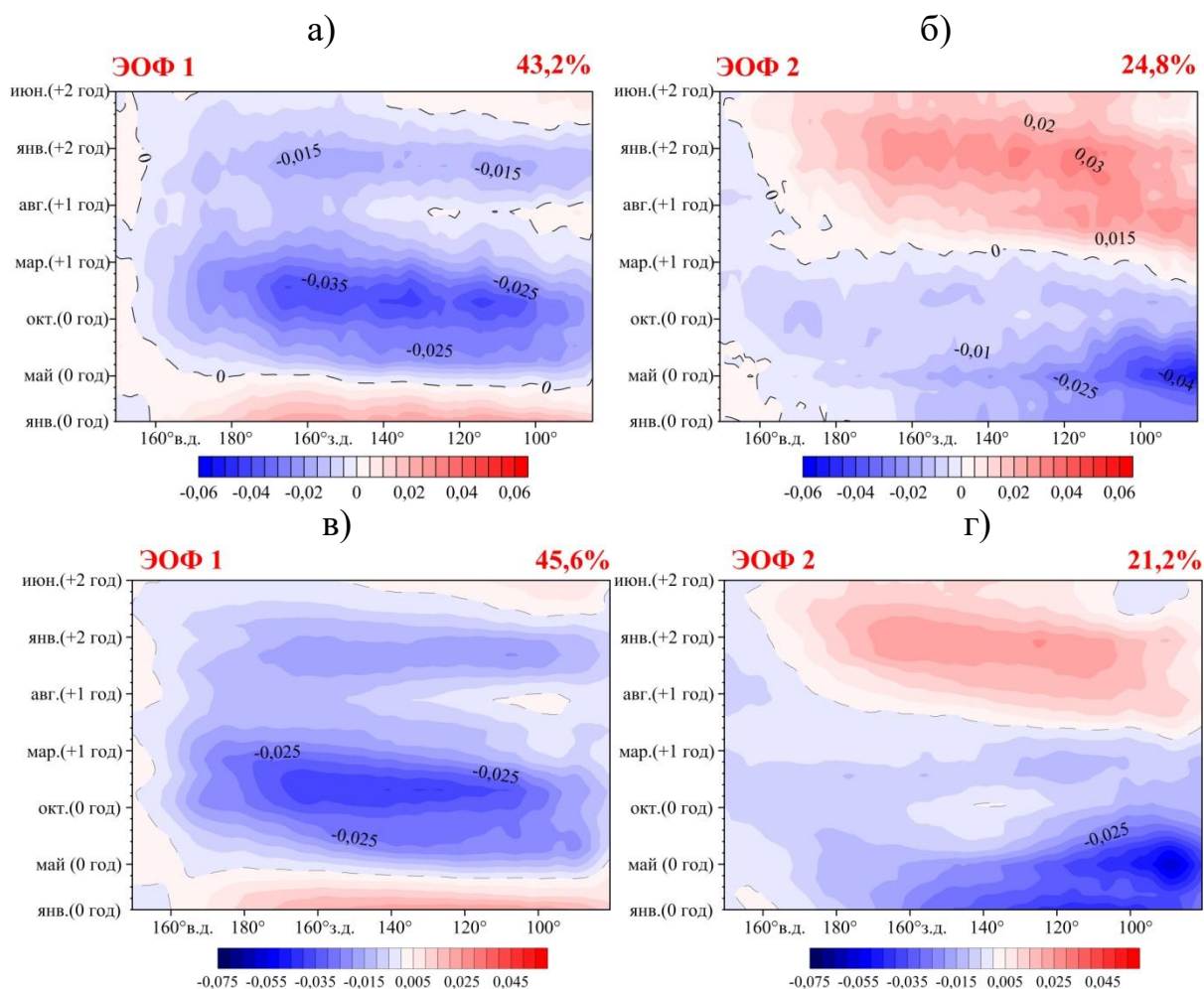


Рисунок 1 – Пространственно-временные диаграммы первых двух мод, полученных по данным HadISST (а, б) и COBE SST2 (в, г).

Вторая мода ЭОФ (22,6% по HadISST и 21,2% по COBE SST2) соответствует Ла-Нинья чисто Восточно-Тихоокеанского типа (рис. 1, б, г), которые возникают в восточно-экваториальной части Тихого океана, там же развиваются и существуют не больше года. После таких событий Ла-Нинья возможно образование Эль-Ниньо «Modoki».

Глава 4 посвящена результатам исследования проявлений Ла-Нинья в межгодовой изменчивости температуры воздуха, приземного давления и осадков в Атлантико-Европейском регионе.

Анализ структуры поля давления в Атлантико-Европейском регионе для разных типов ЛН (рис. 2) показал, что типичные отклики этих событий проявляются в интенсификации/ослаблении Североатлантического колебания (САК), при которой, согласно классической схеме, полученной в 1995 г. в независимых работах [Hurrell, 1995; Voskresenskya, Polonsky, 1995],

переключение фазы САК сопровождается смещением траекторий атлантических циклонов к северо-востоку/юго-западу.

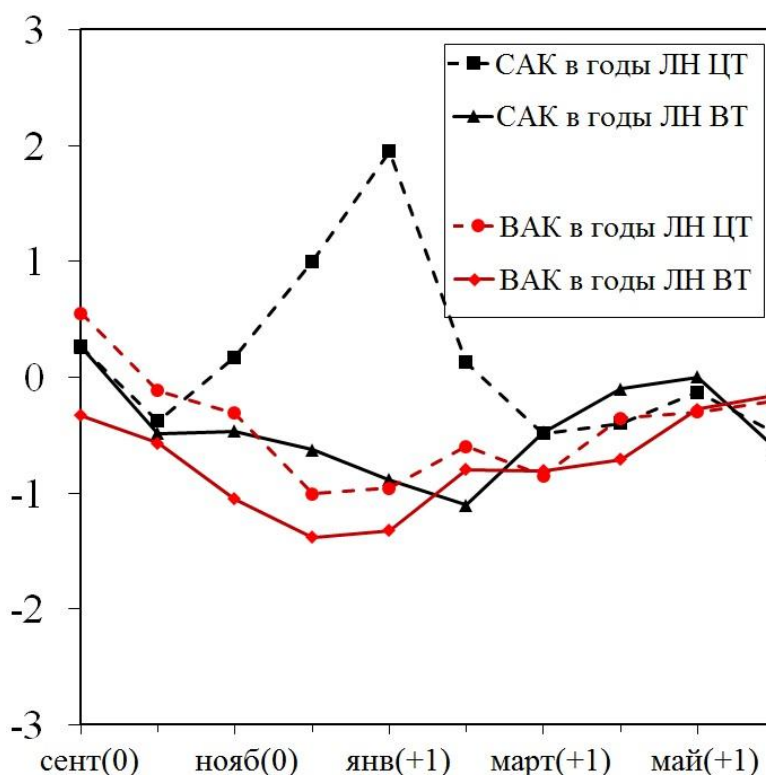


Рисунок 2 – Композиты индексов САК и ВАК для ЦТ и ВТ типов Ла-Нинья с 1950 по 2019 гг.

При Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа структура поля приземного давления соответствует отрицательной фазе Североатлантического колебания (САК). При этом основное количество циклонов из Атлантики проходит по югу Европы и Средиземноморский и Черноморский регионы, что проявляется в существенных положительных аномалиях осадков порядка 80 мм/мес. в зимний период над Пиренейским и Апеннинским полуостровами. В то же время, отмечается усиление отрицательной фазы Восточно-Атлантического колебания (ВАК), что вызывает холодные зимы и позднюю весну в западной, северной и центральной частях Европы, со значениями аномалий до -4°C в феврале и первой декаде марта.

Подтверждение справедливости выявленных проявлений было продемонстрировано на примере Ла-Нинья ВТ типа 2020–2021 гг., которое не было включено в основное исследование. Погодные условия в северной и восточной Европе, наблюдаемые с октября 2020 по май 2021 гг., соответствовали композитам Ла-Нинья ВТ типа, что подтвердило полученный результат в работе.

В годы Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа структура зимнего поля приземного давления над северной Атлантикой соответствует

положительной фазе САК, при которой траектории атлантических циклонов проходят по северу Европы. Это отражается в поле среднемесячных осадков в зимний период в виде положительных аномалий $\sim 100...150$ мм/мес. над Скандинавией, особенно в ее юго-западной части, в то время как для южной и юго-западной части Европы характерны отрицательные аномалии осадков. При этом в западной и северной Европе наблюдается теплая и мягкая погода, в частности, на юге и западе Скандинавии и Великобритании в период с декабря по март.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование закономерностей формирования особенностей межгодовых аномалий в системе океан-атмосфера тропической зоны Тихого океана, соответствующие событиям Ла-Нинья и их проявлений в межгодовой изменчивости гидрометеорологических характеристик Атлантико-Европейского регионов, выполненное в настоящей работе на основе анализа долговременных современных массивов данных, позволило сформулировать следующие выводы.

1. С использованием современных методов анализа по данным ТПО нескольких международных массивов продолжительностью более 100 лет на статистически значимом уровне доказано существование двух типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского, различающихся по месту возникновения, характеру эволюции, продолжительности и интенсивности событий.

2. Выявлены физические различия и особенности формирования Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья.

- События Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа обычно возникают в мае или июне в центре экваториальной зоны Тихого океана. Важную роль при этом играет интенсификация пассатных ветров в этом регионе. Летом, в начальной стадии развития явления там же формируется интенсивный апвеллинг, при котором концентрация хлорофилла «А» увеличивается в 6-8 раз (с $0,1$ мг/м³ до $0,8$ мг/м³), а термоклин в экваториальной зоне между 170° – 100° з.д. поднимается до глубины 50 м. Максимальная фаза развития таких событий приходится на ноябрь-январь.
- Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа возникают в апреле и всегда на востоке. При этом центрально-экваториальный апвеллинг не образуется. Отрицательная аномалия ТПО формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого интенсификацией пассатных ветров над восточно-экваториальным сектором Тихого океана. Максимальная фаза таких событий обычно приходится на октябрь-декабрь.
- Впервые установлены закономерности последовательности возникновения выделенных Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья относительно канонического Эль-Ниньо и

Эль-Ниньо «Modoki». Показана асимметрия в продолжительности существования Эль-Ниньо и Ла-Нинья разных типов.

3. Изучены проявления разных типов Ла-Нинья в Атлантико-Европейском регионе:

- При Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа структура поля приземного давления соответствует отрицательной фазе Североатлантического колебания (САК). При этом основное количество циклонов из Атлантики проходит по югу Европы, Средиземноморский и Черноморский регионы, что проявляется в существенных положительных аномалиях осадков в зимний период, достигающих 80 мм/мес. над Пиренейским и Апеннинским полуостровами. В то же время, отмечается усиление отрицательной фазы Восточно-Атлантического колебания (ВАК), что вызывает холодные зимы и позднюю весну в западной, северной и центральной частях Европы, со значениями аномалий до -4°C в феврале и первой декаде марта.

- В годы Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа структура в поле приземного давления в зимний период над северной Атлантикой соответствует положительной фазе САК, при которой траектории Атлантических циклонов проходят по северо-западу Европы. Это проявляется в поле среднемесячных осадков в виде положительных аномалий $\sim 100\text{...}150$ мм/мес. над Скандинавией, особенно в ее юго-западной части. При этом в западной и северной Европе наблюдается теплая и мягкая погода. Для южной и юго-западной частей Европы характерны значимые отрицательные аномалии осадков в период ЦТ типа Ла-Нинья.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, входящие в наукометрическую базу **Scopus** и **Web of Science**:

1. Voskresenskaya E. N., **Marchukova O.V.** Qualitative classification of the La Nina events // *Physical Oceanography*. 2015. Vol. 3. P. 14-24. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-3-14-24

2. Voskresenskaya, E.N., **Marchukova O.V.** Spatial classification of La Nina events // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. Vol. 53. Issue 1. P. 111–119 DOI:10.1134/S0001433817010133

3. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.** Прогнозирование индекса Южного Колебания // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2017. Т. 62. №4. С. 370–388 DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.404

4. Voskresenskaya E.N., **Marchukova O.V.**, Maslova V.N., Lubkov A.S. Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 107. DOI:10.1088/1755-1315/107/1/012043

5. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., **Marchukova O.V.** Application of a neural network model to forecasting of El Niño and La Niña // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 386. 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012040

6. **Марчукова О.В.**, Лубков А.С., Воскресенская Е.Н. Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 97–120. DOI: 10.21638/spbu07.2020.106

7. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., **Marchukova O.V.** Forecasting El Niño/La Niña and Their Types Using Neural Networks // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Vol. 45. № 11. P. 806–813. DOI: 10.3103/S1068373920110084

8. **Marchukova O.V.**, Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S. Diagnostics of the La Niña events in 1900–2018 // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 606. P. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012036

9. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., **Marchukova O.V.**, Evstigneev V.P. European temperature anomalies in the cold period associated with ENSO events // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 606. P. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012031

10. Vyshkvarkova E., Rybalko E., **Marchukova O.**, Baranova, N. Assessment of the Current and Projected Conditions of Water Availability in the Sevastopol Region for Grape Growing // Agronomy. 2021. 11. 1665. DOI: 10.3390/agronomy11081665

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня **ВАК** и **РИНЦ**:

1. Воскресенская Е.Н., Лубков А. С., **Марчукова О.В.** Пространственная классификация Эль-Ниньо и условия формирования события 2015 года // Системы контроля окружающей среды. 2015. Вып. 2(22). С. 80–90.

2. **Марчукова О.В.**, Воскресенская Е. Н., Лубков А. С. Статистический прогноз Эль-Ниньо 2015-2016 годов и его верификация // Системы контроля окружающей среды. 2016. Вып. 4(24). С. 80–90.

3. **Марчукова О.В.**, Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н., Лубков А.С. Ла-Нинья 2016 года в рамках пространственной классификации событий // Системы контроля окружающей среды. 2016. Вып. 6(26). С. 84–92.

4. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.** Объективная классификация явлений Эль-Ниньо // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2017. №1(149). С. 41–44.

5. Лубков А.С., Воскресенская Е. Н., **Марчукова О.В.** Современная классификация Эль-Ниньо и сопоставление соответствующих климатических откликов // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 7(27). С. 94–100.

6. **Марчукова О.В.** Воскресенская Е. Н., Лубков А. С. Проявление разных типов Ла-Нинья в Черноморском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 8(28). С. 79–85.

7. **Марчукова О.В.** Воскресенская Е. Н. Гидрометеорологические аномалии в Азово-Черноморском регионе в годы явления Ла-Нинья // Труды Государственного океанографического института. 2017. №218. С. 255–264.

8. **Марчукова О.В.** Воскресенская Е. Н. События Ла-Нинья 2016 и 2017 годов и их дальноедействие в Атлантико-Европейском регионе // Системы контроля окружающей. 2018. Вып. 12(32). С. 80–85.

9. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.**, Журавский В.Ю. Проявление событий Эль-Ниньо в Черноморском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2018. Вып. 4(34). С. 94–101. DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-94-101

10. **Марчукова О.В.**, Воскресенская Е.Н. Сочетание разных типов Ла-Нинья с Тихоокеанской декадной осцилляцией // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 1(35). С. 72–78 DOI: 10.33075/2220-5861-2019-1-72-78

11. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.** Температурные аномалии в Европе в холодный период года в связи с ЭНЮК // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 2(36). С. 73–80 DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-73-80

12. **Марчукова О.В.**, Воскресенская Е.Н. Тенденции изменения концентрации льда и температуры воздуха в Арктике // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1(43). С. 25–34. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-25-34

13. Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.**, Афанасьева В.В. Оценка возможных изменений повторяемости событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья к концу XXI века по моделям проекта CMIP6 // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 4(46). С. 14–21. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-14-21